

于晓燕, 商亚男, 魏光普, 等. 基于PLUS-InVEST模型的国家级稀土矿区土地利用变化与碳储量预测研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(5):000-000.

YU X Y, SHANG Y N, WEI G P, et al. Land use change and prediction of carbon storage in national rare earth mining area based on PLUS-InVEST model[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(5):000-000.

基于PLUS-InVEST模型的国家级稀土矿区土地利用变化与碳储量预测研究

于晓燕^{1,2}, 商亚男^{1,2}, 魏光普^{2*}, 张舒宇², 吴健^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学 经济与管理学院/产业信息化与产业创新研究中心, 内蒙古 包头 014010;

2. 黄河“几字弯”发展研究基地, 内蒙古 包头 014010)

摘要: [目的]探究国家级稀土矿区土地利用变化对碳储量的影响, 有助于改善本区域的碳效应, 早日实现碳达峰、碳中和的目标。[方法]采用PLUS-InVEST耦合模型, 分析了矿区近20年的土地利用变化, 并设置自然发展、生态保护和城镇发展3种情景进行预测。[结果]2000-2020年, 矿区土地利用类型包括草地、裸地等5类, 总面积36 197.34 hm², 草地占比超过80%。期间, 土地利用发生了5 679.20 hm²的变化, 草地转为裸地面积为3 418.88 hm²; 不同情景下, 2030年裸地面积的变化最大, 分别在自然发展、生态保护和城镇发展情景下增长36.86%、减少10.76%、增加40.74%; 碳储量随时间逐年下降, 2000, 2010, 2020年碳储量分别为24.15×10⁵, 23.29×10⁵, 22.18×10⁵ t。2030年碳储量预测结果: 自然发展情景为21.25×10⁵ t, 生态保护情景为22.17×10⁵ t, 城镇发展情景为21.13×10⁵ t。与2020年相比, 除生态保护情景外, 其他情景均显示碳储量下降。[结论]矿区的裸地和建设用地扩张是碳储量下降的主要原因。为实现2030年碳达峰目标, 需加强矿山生态修复, 增加草地覆盖率。

关键词: 稀土矿区; 碳储量; PLUS-InVEST; 土地利用变化; 多情景模拟

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)05-0000-12

Land Use Change and Prediction of Carbon Storage in National Rare Earth Mining Area Based on PLUS-InVEST Model

YU Xiaoyan^{1,2}, SHANG Yanan^{1,2}, WEI Guangpu^{2*}, ZHANG Shuyu², WU Jian^{1,2}

(1. Research Center of Industrial Informationization and Innovation/School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010, China; 2. Yellow River Jiziwan Development Research Institute, Baotou Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: [Objective] Exploring the impact of land use changes in national-level rare earth mining areas on carbon storage is crucial for improving the carbon effects in the region and achieving the targets of carbon peak and carbon neutrality. [Methods] This study uses the PLUS-InVEST coupled model to analyze land use changes over the past 20 years in the mining area and predicts three scenarios: natural development, ecological protection, and urban development. [Results] From 2000 to 2020, the land use types in the mining area included five types, grassland, bare land, and other categories, with a total area of 36,197.34 hm², the grassland accounted for over 80%. During this period, land use underwent a change of 5,679.20 hm², with 3,418.88 hm² of grassland converted into bare land; under different scenarios, the bare land area showed the greatest change by 2030. In the natural development, ecological protection, and urban development scenarios, the area increased by 36.86%, decreased by 10.76%, and increased by 40.74%, respectively; Carbon storage declined year by year, with carbon storage values of 24.15×10⁵, 23.29×10⁵, and 22.18×10⁵ t in 2000,

收稿日期: 2024-11-25 修回日期: 2025-02-08

基金项目: 内蒙古自治区高校人文社会科学重点研究基地基金项目(KFSM-KDSK0207); 内蒙古自治区一流学科科研专项基金项目(YLXKZX-NKD-025); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2022LHMS07004)

第一作者: 于晓燕(1985-), 女, 博士, 副教授, 从事资源环境管理与可持续发展研究, E-mails: Yu_Xiaoyan@imust.edu.cn

通信作者: 魏光普(1986-), 男, 博士后, 副教授, 从事矿山生态修复与可持续设计研究, E-mails: Wei_Guangpu@imust.edu.cn

2010, and 2020, respectively. The predicted carbon storage for 2030 is as follows: 21.25×10^5 t under the natural development scenario, 22.17×10^5 t under the ecological protection scenario, and 21.13×10^5 t under the urban development scenario. Compared with 2020, carbon storage decreased in all scenarios except for the ecological protection scenario. **[Conclusion]** The study shows that the expansion of bare land and construction land is the main reason for the decline in carbon storage. To achieve the carbon peak target by 2030, ecological restoration of the mining area should be strengthened, and grassland coverage should be increased.

Key words: rare earth mining area; carbon storage; PLUS-InVEST; land use change; multi-scenario simulation

温室气体大量排放加剧了全球气候变暖,严重威胁经济与社会的可持续发展^[1-2]。全球碳循环中,陆地生态系统作为重要的碳储存主体,发挥着不可替代的作用^[3-4]。然而,不同土地利用类型固碳能力差异较大,矿业活动作为一种典型的人类活动,对土地利用类型变化和碳储量具有较大的影响^[5-6]。近年来,关于土地碳储量的研究逐渐增多,研究发现耕地和草地减少、建设用地扩张是导致碳储量下降的主要因素,而海拔和植被指数则是碳储量空间分异的主导因素^[7]。此外,不同土地利用类型与气候条件对土壤有机碳储量的影响也得到了关注,研究表明森林减少显著降低了土壤碳密度^[8],通过分析土地利用变化对碳储量的影响,发现土壤碳储量对总碳储量的变化贡献最大^[9]。国家级稀土矿区面临资源开发与生态保护的尖锐矛盾,其土地利用变化过程集中反映了稀土产业扩张、新能源用地需求激增与传统牧草地萎缩的三重博弈,对其进行土地利用变化研究能揭示战略资源开发的时空效应规律,避免因过度开发导致战略资源枯竭,为矿区资源可持续开发提供科学依据。

未来土地利用情景的研究模型主要包括CA-Markov、FLUS、CLUE-S和PLUS等^[10-13],其中,PLUS模型的模拟精度、数据处理能力,更适合土地利用类型的复杂演变研究^[14],PLUS模型通过研究广东省河源市2030年土地利用的3种情景,以耕地为例分析了空间分布特征及驱动因子的相关性^[15]。此外,在陆地生态系统碳储量研究中,InVEST模型适用于长时间和大尺度的研究,是目前估算生态系统碳储量的常用模型^[16]。尽管现有研究揭示了土地利用变化对碳储量的影响规律,但仍存在不足之处^[17]:一是多集中于城市或流域尺度,缺乏对特殊生态系统如国家级稀土矿区的关注;二是对碳储量的驱动机制分析较为片面,未全面结合土地利用动态变化。因此,在国家级稀土矿区土地利用演变和碳储量研究中采用PLUS-InVEST模型更为适合。

本研究首先利用PLUS模型预测2030年国家级稀土矿区3种情景下的土地利用格局;其次,结合InVEST模型计算2000-2020年的碳储量,以及预测3种情景下2030年的碳储量;最后,通过分析矿区碳储量时空分异特征及其驱动因素,为土地利用结构的优化、生态保护和经济发展的可持续性提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

国家级稀土矿区(以下简称为白云鄂博矿区)是中国最重要的稀土产业基地,位于包头市东南部,距包头市区约40 km。该矿区是全球最大的稀土矿所在地,稀土产量约占全世界已探明总量的41%,被誉为“世界稀土之都”。白云鄂博矿区地处北方防沙带和阴山北麓生态功能区内,是全国生态格局的重要组成部分,也是华北地区生态结构的重要屏障。然而,该地区生态系统类型结构单一,自我调节恢复能力较弱,生态环境极为脆弱。白云鄂博矿区地理坐标为东经 $109^{\circ}47' \sim 110^{\circ}04'$,北纬 $41^{\circ}39' \sim 41^{\circ}53'$,总面积 328.64 km^2 。研究区域位置如图1。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 土地利用类型数据 本研究采用白云鄂博矿区2000,2010,2020年3期的土地利用类型数据,数据来源于武汉大学提供的中国土地覆盖数据集(CLCD)^[18],空间分辨率为30 m,将白云鄂博矿区土地利用类型划分为耕地、草地、水体、裸地和建设用地5种地类。利用ArcGIS软件的投影和定义投影功能^[19],将所有栅格数据进行坐标系统的统一处理,地理坐标系设置为GCS_WGS_1984,投影坐标系设置为WGS_1984_UTM_Zone_49N,确保数据的空间一致性。

1.2.2 土地利用变化驱动因子 本研究选择自然因素和社会因素作为土地利用变化的驱动因子。自然因素包括:数字高程模型(DEM)、坡度、年平均温度和年平均降水量;社会因素包括:人口密度、GDP、距水域的距离、

距铁路的距离和距公路(高速/国道/省道)的距离。DEM数据通过NASA的Earthdata网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)下载,空间分辨率为30 m;坡度数据使用ArcGIS从DEM数据中提取;气候数据(年平均气温和年平均降水)来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下设的国家环境信息中心(NCEI)(<https://www.ngdc.noaa.gov/>),分辨率为30 m;GDP数据来源于中科院资源科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),分辨率为1 km;人口密度数据来源于WorldPop项目(<https://www.worldpop.org/>),分辨率为100 m;交通区位数据从OpenStreetMap(<https://wiki.openstreetmap.org/>)下载,并在ArcGIS中采用欧氏距离法计算得到。

为保证所用数据的准确性,将所有驱动因子数据在ArcGIS中统一进行空间重采样,分辨率调至30 m,与土地利用数据保持一致,同时,所有数据均采用统一的地理坐标系(GCS_WGS_1984)和投影坐标系(WGS_1984_UTM_Zone_49N),确保分析结果的可靠性和科学性。

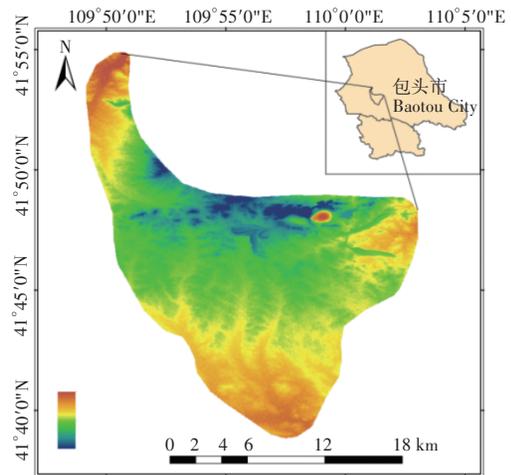


图1 研究区位置示意

Figure 1 Location map of the study area

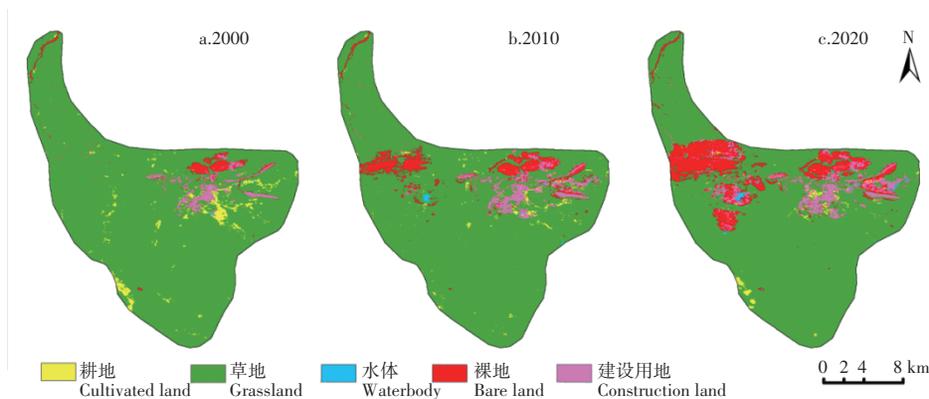


图2 白云鄂博矿区2000-2020年土地利用现状

Figure 2 Land use status of Bayan Obo Mining District from 2000 to 2020

1.3 研究方法

1.3.1 PLUS模型 PLUS模型是一种基于栅格数据的斑块生成土地利用变化预测模型,两个核心模块包括:用地扩张分析策略(LEAS)模块^[20],基于多类随机斑块种子的CA模型(CARS)模块^[21]。其中,LEAS模块生成土地利用发展概率图谱,直观反映土地利用变化的可能性及其概率分布^[22],CARS模块则通过结合随机种子生成和阈值递减机制,根据LEAS生成的概率图谱,动态模拟土地利用斑块的生成与演变^[23]。通过设置不同情景下的土地利用转移概率,PLUS模型能够精确模拟出研究区未来土地利用变化的空间格局和演变趋势。

根据白云鄂博矿区2000和2010年的土地利用及驱动因子数据,采用PLUS模型模拟2020年土地利用类型,并采用Kappa系数^[24]和FOM指数做评价指标,精度达标方可进一步预测2030年白云鄂博矿区土地利用变化的空间分布及演变趋势。

1.3.2 多情景设定 基于白云鄂博矿区2020-2035年国土空间总体规划设置3种发展情景,分别是自然发展情景(Q1)、生态保护情景(Q2)和城镇发展情景(Q3),以探讨不同情景下土地利用的空间演变特征。自然发展情景假设矿区在未来发展中采取以矿山开采提高经济效益的模式,该情景能够评估在不采取生态保护措施下,裸地的增加对碳储量的潜在影响。延续2000-2020年的发展趋势,保持原有土地类型转移时的转移概率和领域权重不变。基于PLUS模型中的Markon模块,预测2030年5种土地利用类型的空间分布,同时将水域设为限制扩张区域。Q1是另外两种情景模拟的基础,为后续情景预测提供参考框架。生态保护情景假设矿区在未来发

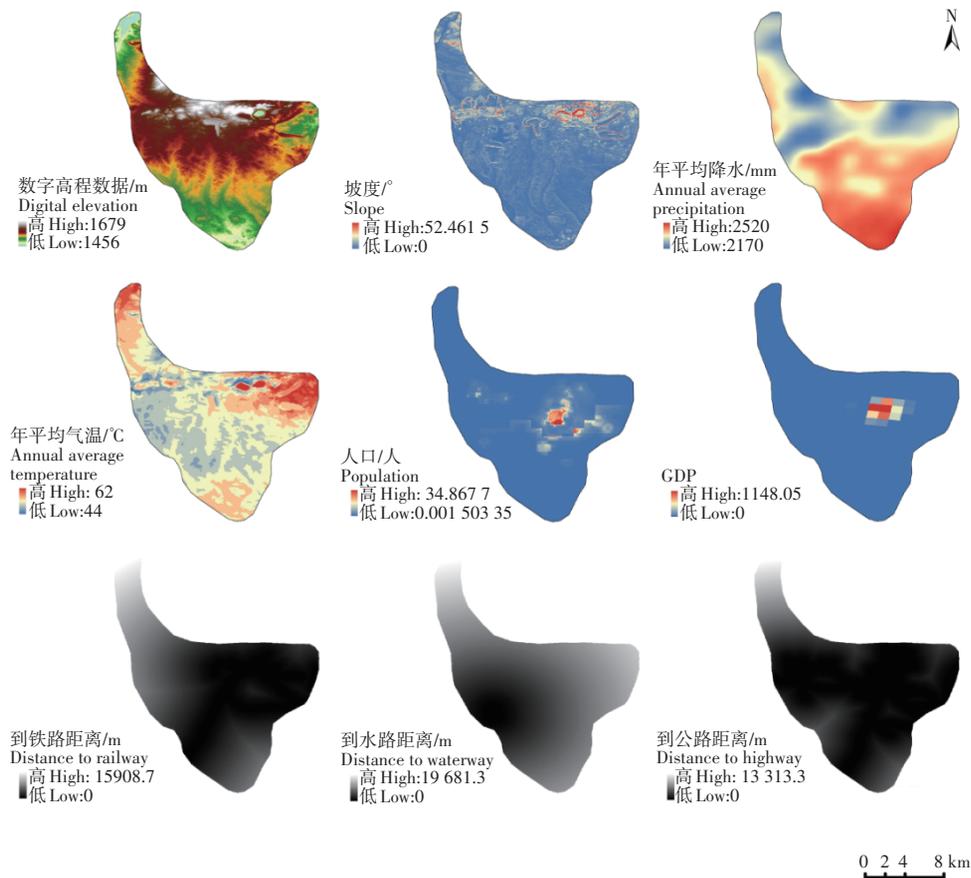


图3 土地利用变化驱动因子

Figure 3 Driving factors of land use change

展中采取生态环境保护优先的模式,并结合区域生态修复和环境保护的需求。在Q1的基础上,Q2情景引入生态保护驱动因子,限制城镇化扩张,并通过控制自然生态土地向其他类型土地的转化来保护生态环境。城镇发展情景假设矿区在未来发展中采取促进城镇化和基础设施建设为主的模式,土地利用将更多转向建设用地。在此情景下,不考虑政策因素,并且对不同的土地利用种类之间的转换不设约束。

这3种情景的设置能够全面覆盖白云鄂博矿区不同的未来发展路径,通过这些情景可以预测不同发展路径下土地利用格局和生态环境变化,根据模型参数设置白云鄂博矿区的土地转移成本矩阵(表1)。

表1 白云鄂博矿区的土地转移成本矩阵

Table 1 Matrix of land transfer costs in the Bayan Obo Mining District

| 情景模式 Scenario mode | 自然发展(Q1) Natural development scenario | | | | | 生态保护(Q2) Ecological protection scenario | | | | | 城镇发展(Q3) Urban development scenario | | | | |
|--------------------------|--|---|---|---|---|--|---|---|---|---|--|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E |
| 土地利用类型 Land use types | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| B | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| D | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

注:A.耕地;B.草地;C.水体;D.裸地;E.建设用地。

Note:A.Cultivated land;B.Grassland;C.Waterbody;D.Bare land;E.Construction land.

1.3.3 基于InVEST模型的碳储量估算

1.3.3.1 InVEST模型 InVEST模型是一种集成化的生态系统服务价值量化和可视化评估工具^[25]。该模型通过模拟不同土地覆盖情景下生态服务系统的物质和价值量变化,采用生态系统物理机制评估方法,可以得

到高精度和高分辨率的分析结果。InVEST模型的可视化显著增强了结果的直观性与可解释性,弥补了传统方法在空间异质性和动态特征呈现上的不足;其量化与可视化的结合,不仅揭示了生态服务在不同情景下的动态变化,还为科学研究、政策制定和土地利用规划等提供了可靠的数据支持,因此,InVEST模型成为生态保护^[26]、资源管理^[27]和土地利用规划^[28]等领域中的重要评估工具。

1.3.3.2 碳密度修正 InVEST模型的碳储存和碳封存模块使用土地利用图以及四个碳库(地上生物量、地下生物量、土壤和凋落物)中的碳储量数据,来估算白云鄂博矿区内的碳储量总量^[29]。模型运行需要明确不同土地利用类型的碳密度参数,碳密度初始数据结合碳密度修正公式进行校正,以匹配该区域的实际情况,为碳储量估算提供更精确的数据。

利用 Carbon 模块进行模拟和预测,计算公式为:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (1)$$

式中: C_{total} 为生态系统总碳储量; C_{above} 为地类的地上生物碳储量; C_{below} 为地类的地下生物碳储量; C_{soil} 为地类的土壤碳储量; C_{dead} 为凋落物(死亡)碳储量,由于凋落物碳密度所占比例较小,均默认为0。

将 2000-2020 年研究区年降水量和年均气温代入碳密度修正公式^[30],修正为符合研究区对应年份的碳密度,计算公式为:

$$\begin{aligned} C_{SP} &= 3.3968 \times MAP + 3996.1 \\ C_{BP} &= 6.798 \times e^{0.0054 \times MAP} \\ C_{BT} &= 28 \times MAT + 398 \end{aligned} \quad (2)$$

式中:MAP为白云鄂博矿区年平均降水量(mm);MAT为白云鄂博矿区年平均气温(°C); C_{BP} 为根据年均降雨量修正得到的地上生物量碳密度($t \cdot hm^{-2}$); C_{BT} 为根据年均气温修正得到的地上生物量碳密度($t \cdot hm^{-2}$); C_{SP} 为根据年均降雨量修正得到的土壤碳密度($t \cdot hm^{-2}$)。

修正系数计算公式为:

$$\begin{aligned} K_{BP} &= \frac{C_{BP}^1}{C_{BP}^2} \\ K_{BT} &= \frac{C_{BT}^1}{C_{BT}^2} \\ K_B &= K_{BP} \times K_{BT} \\ K_S &= \frac{C_{SP}^1}{C_{SP}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: K_{BP} 和 K_{BT} 分别为生物量碳密度降水因子和气温因子的修正系数; K_B 和 K_S 分别为生物量碳密度和土壤有机碳密度的修正系数。综合所有计算可得表2。

表2 白云鄂博矿区不同土地利用类型的碳密度

| 土地利用类型 Land use types | 地上碳密度(C_{above}) Aboveground carbon density | 地下碳密度(C_{below}) underground carbon density | 土壤碳密度(C_{soil}) Soil carbon density | 死亡碳密度(C_{dead}) Dead organic matter carbon density |
|---------------------------|--|--|--|---|
| 耕地 Cultivated land | 3.88 | 5.36 | 83.59 | - |
| 草地 Grassland | 1.25 | 7.59 | 89.47 | - |
| 水体 Waterbody | 0.00 | 0.00 | 0.00 | - |
| 裸地 Bare land | 0.68 | 1.31 | 40.08 | - |
| 建设用地 Construction land | 0.00 | 0.00 | 36.58 | - |

2 结果与分析

2.1 基于PLUS模型对白云鄂博矿区土地利用分布的模拟与预测

基于白云鄂博矿区 2000 年和 2010 年的土地利用数据,采用 PLUS 模型对 2020 年的土地利用格局进行了模拟预测,并通过 Validation 模块与 2020 年实际的土地利用数据进行对比验证。结果可知,PLUS 模型的整体精度为 0.89, Kappa 系数为 0.65,表明该模型在土地利用模拟方面具有较高的可靠性。研究结果进一步验证了

PLUS模型在白云鄂博矿区土地利用的模拟与预测中的有效性。

2.1.1 土地利用时空分布特征 从空间分布特征来看,2000,2010,2020年的土地利用格局呈现出显著的区域特征。研究发现,草地在整个研究区内广泛分布;裸地主要集中于研究区中部,尤其是白云鄂博矿区及采矿点周边区域;城镇用地主要集中分布于矿山周围;耕地和水面面积较小。土地利用的转移活动集中在矿区周边区域,而研究区其它区域的土地利用变化较为有限,空间分布呈现较高的稳定性。空间分布特征反映了研究区土地利用格局在不同时期的动态变化,以及其与矿区开发活动的关联性。

2000-2020年,草地始终是白云鄂博矿区的主要土地利用类型,占整个研究区的80%以上,其次为裸地和建设用地;水体、裸地和建设用地的面积均呈增加趋势,而耕地和草地呈下降趋势,累计减少约4 687.12 hm²(表3)。

表3 白云鄂博矿区土地利用变化
Table 3 Land use change of Bayan Obo Mining District

| 土地利用类型 Land use types | 2000 | | 2010 | | 2020 | | 2000-2020 面积变化 Area change from 2000 to 2020 |
|---------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|---|
| | 面积/hm ² Area | 占比/% Proportion | 面积/hm ² Area | 占比/% Proportion | 面积/hm ² Area | 占比/% Proportion | 面积/hm ² Area |
| 耕地 Cultivated land | 1 034.23 | 2.86 | 440.70 | 1.22 | 372.28 | 1.03 | -661.95 |
| 草地 Grassland | 33 537.68 | 92.65 | 32 065.08 | 88.58 | 29 512.51 | 81.53 | -4 025.17 |
| 水体 Waterbody | 20.37 | 0.06 | 76.16 | 0.21 | 102.19 | 0.28 | 81.82 |
| 裸地 Bare land | 619.29 | 1.71 | 2 041.90 | 5.64 | 3 956.10 | 10.93 | 3 336.81 |
| 建设用地 Construction land | 985.77 | 2.72 | 1 573.49 | 4.35 | 2 254.26 | 6.23 | 1 268.49 |

2.1.2 土地利用转移特征 白云鄂博矿区2000-2020年间土地利用类型的动态变化及转移情况如表4。研究区5种土地利用类型面积均发生了变化,草转出总计4 717.65 hm²,主要向裸地和建设用地转移,面积为3 418.88 hm²和1 064.37 hm²;裸地面积明显增加,从619.29 hm²增长到3 956.10 hm²,转入来源主要是草地,面积为3 462.57 hm²;建设用地同样呈增长趋势,增加面积为1 268.49 hm²,转入来源主要是草地,面积为1 269.26 hm²。整体来看,草地大规模转化为裸地和建设用地是土地利用变化的主要特征,反映了矿区人类活动和开发行为的影响。

表4 2000-2020年白云鄂博矿区土地利用类型转移矩阵
Table 4 Land use type transfer matrix of Bayan Obo Mining District from 2000 to 2020 hm²

| 土地利用类型 Land Use Types | 2020 | | | | | 总和 Total | 转出总计 Total outgoing transfers |
|----------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------|----------------------------------|
| | 耕地 Cultivated land | 草地 Grassland | 水体 Waterbody | 裸地 Bare land | 建设用地 Construction land | | |
| 耕地 Cultivated land | 214.94 | 612.72 | 14.95 | 42.27 | 149.35 | 1 034.23 | 819.29 |
| 草地 Grassland | 154.12 | 28 820.03 | 80.28 | 3 418.88 | 1 064.37 | 33 537.68 | 4 717.65 |
| 水体 Waterbody | 2.58 | 4.51 | 4.64 | 1.42 | 7.22 | 20.37 | 15.73 |
| 裸地 Bare land | 0.64 | 75.12 | 1.68 | 493.53 | 48.32 | 619.29 | 125.76 |
| 建设用地 Construction land | 0.00 | 0.13 | 0.64 | 0.00 | 985.00 | 985.77 | 0.77 |
| 总和 Sum | 372.28 | 29 512.51 | 102.19 | 3 956.10 | 2 254.26 | 36 197.34 | |
| 转入总计 Total incoming transfers | 157.34 | 692.48 | 97.55 | 3 462.57 | 1 269.26 | | 5 679.20 |

不同土地利用类型之间的转移过程及趋势见图4。桑基图通过直观的流动关系展示了各土地利用类型在3个时段内的演变过程。由图4可知,林地和草地在3个时段内占据主导地位,面积略有减少,但总体保持相对稳定;裸地面积在2010年到2020年期间呈现明显扩张趋势,这表明人类活动或生态扰动的增强;建设用地的面积变化较小,但呈现逐步增加的态势,反映了城镇化或基础设施建设的推进;此外,耕地面积变化较小,但在部分区域发生了向其他用地类型的转移。

2.2 2030年LUCC模拟

利用PLUS模型对白云鄂博矿区3种情景下的土地利用变化进行模拟(图5),2030年不同情景模式下土地利用变化较大,土地利用格局呈现明显的分化特征。研究表明,自然发展情景与城镇发展情景的变化趋势较为相似,裸地和建设用地大幅度增加,且城镇发展情景略大于自然发展情景;生态保护情景下,耕地面积有所增加,建设用地和裸地扩张受限,反映了通过生态保护政策可以明显减少人类对土地的过度开发。

3种情景下的研究区土地利用类型占比如表5,具体数据表明,生态保护情景与城镇发展情景的土地利用格局有高度相似性,5种地类面积差异较小,自然发展情景下草地面积略大于城镇发展情景;生态保护情景耕地面积和草地面积远大于其他两种情景,同时裸地和建设用地的扩张也有所减缓,反映出生态保护政策对土地利用格局的优化作用。

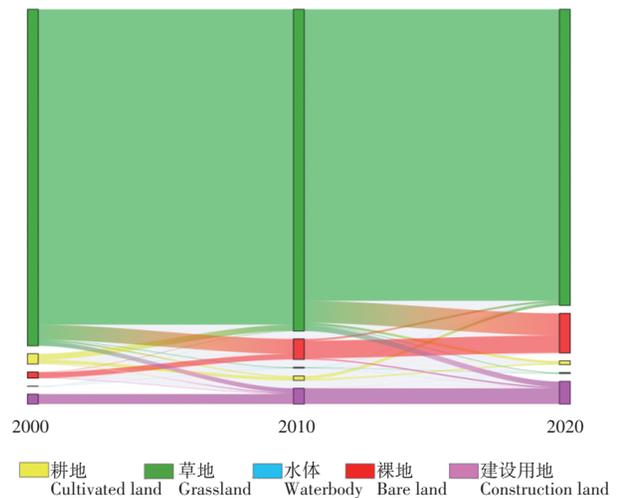


图4 白云鄂博矿区2000-2020转移矩阵

Figure 4 Transfer matrix of Bayan Obo Mining District from 2000 to 2020

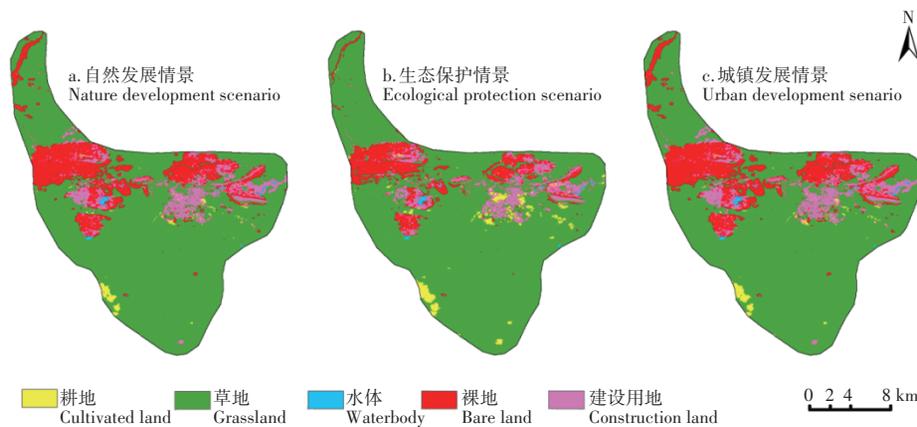


图5 白云鄂博矿区3种情景的土地利用分布

Figure 5 Land use distribution of the three scenarios in Bayan Obo Mining District

表5 3种情景下白云鄂博矿区土地利用类型占比

Table 5 Proportion of land use types in Bayan Obo Mining District under the three scenarios

| 土地利用类型 Land use types | 自然发展情景 Natural development scenario | | 生态保护情景 Ecological protection scenario | | 城镇发展情景 Urban development scenario | |
|---------------------------|--|--------------------|--|--------------------|--------------------------------------|--------------------|
| | 面积/hm ² Area | 占比/% Proportion | 面积/hm ² Area | 占比/% Proportion | 面积/hm ² Area | 占比/% Proportion |
| 耕地 Cultivated land | 335.68 | 0.93 | 849.95 | 2.35 | 355.78 | 0.98 |
| 草地 Grassland | 27 330.94 | 75.51 | 29 022.99 | 80.18 | 27 018.46 | 74.64 |
| 水体 Waterbody | 115.2 | 0.32 | 115.46 | 0.32 | 115.07 | 0.32 |
| 裸地 Bare land | 5 414.39 | 14.96 | 3 530.6 | 9.75 | 5 567.99 | 15.38 |
| 建设用地 Construction land | 3 001.12 | 8.29 | 2 678.33 | 7.40 | 3 140.03 | 8.67 |

白云鄂博矿区在不同情景下的土地利用变化特征如表6,通过对比数据,可以清晰地看出不同情景下土地利用类型的空间格局演变及其变化趋势。在自然发展情景下,草地面积明显减少,下降幅度为7.39%,裸地和建设用地面积分别大幅增加,增幅分别为36.86%和33.13%,反映了人类活动对生态系统的干扰和扩展趋势;生态保护情景则以恢复生态平衡为目标,表现出明显的生态修复特征,其中耕地面积显著增加,增幅为

128.31%,裸地面积略有下降,下降幅度为 10.76%,显示出生态保护措施对土地利用格局优化的积极作用。相比之下,城镇发展情景呈现出强烈的城镇化驱动特征,裸地和建设用地面积分别增加 40.74% 和 39.29%,表明城镇扩张对区域土地利用变化的主导作用。

表6 白云鄂博矿区3种情景下3种土地利用类型面积与变化率

Table 6 Area and change rate of three land use types under the three scenarios of Bayan Obo Mining District

| 情景模式 Scenario model | 耕地 Cultivated land | 草地 Grassland | 水体 Waterbody | 裸地 Bare land | 建设用地 Construction land |
|---|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 2020年面积/hm ² Area in 2020 | 372.28 | 29 512.51 | 102.19 | 3 956.10 | 2 254.26 |
| 2030年自然发展情景面积/hm ² 2030 natural development scenario area | 335.68 | 27 330.94 | 115.20 | 5 414.39 | 3 001.12 |
| 2030年生态保护情景面积/hm ² 2030 ecological protection scenario area | 849.95 | 29 022.99 | 115.46 | 3 530.60 | 2 678.33 |
| 2030年城镇发展情景面积/hm ² 2030 urban development scenario area | 355.78 | 27 018.46 | 115.07 | 5 567.99 | 3 140.03 |
| 2030年自然发展情景变化率/% 2030 natural development scenario change rate | -9.83 | -7.39 | 12.74 | 36.86 | 33.13 |
| 2030年生态保护情景变化率/% 2030 ecological protection scenario change rate | 128.31 | -1.66 | 12.99 | -10.76 | 18.81 |
| 2030年城镇发展情景变化率/% 2030 urban development scenario change rate | -4.43 | -8.45 | 12.61 | 40.74 | 39.29 |

结合不同情景模式的土地利用变化特点可知,建设用地的扩张在自然发展和城镇发展情景下尤为明显,而生态保护情景更倾向于促进耕地和水体的恢复,同时也减少了裸地面积。研究区土地利用格局的调整反映了生态保护和城市化进程对土地资源的影响。

2.3 碳储量变化评估及碳储量预测

2.3.1 白云鄂博矿区碳储量变化评估 利用InVEST模型对白云鄂博矿区的碳储量进行模拟(图6)。研究区大部分的碳储量在2000-2020年间未发生明显变化(图6a~图6c)。碳储量变化较大的区域主要集中在矿山周围,大量的草原地带转化为碳密度较低的建设用地和裸地,碳储量呈现出逐步下降的趋势,主要原因是经济发展和人口增长所引起的城市扩张。研究区碳储量变化呈现出以矿山为中心,逐步向周围区域扩展的减少趋势。

白云鄂博矿区 2000, 2010, 2020 年的碳储量分别为 2.41×10^6 , 2.33×10^6 , 2.22×10^6 t, 呈下降趋势; 2000-2010 年白云鄂博矿区总碳储量减少 8.60×10^4 t, 相对于 2000 年, 减少 3.56%; 2010-2020 年该区域总碳储量减少 1.11×10^5 t, 相对于 2010 年, 减少 4.76%。2000-2020 年白云鄂博矿区总碳储量减少 1.97×10^5 t, 减幅少 8.15%, 年均减少 9.85×10^3 t。数据表明, 研究区碳储量受时间尺度的明显影响, 且减少趋势在 2010 年后有所加剧, 这主要源于社会经济发展需求日益提高, 尤其是白云鄂博的开采活动逐渐加剧, 导致碳储量急剧减少。在矿区开采过程中, 原生态植被被破坏, 土壤层的碳储量也随之减少, 尽管矿区实施了一些生态修复措施, 但由于修复工作往往需要较长时间才能显现效果, 且矿业经济的快速发展会促进矿区的进一步开发, 进而影响碳储量。因此在 2000-2020 年间的碳储量变化未能充分反映修复效果。

2.3.2 2030年不同情景下碳储量预测 通过PLUS模型设置的3种情景下的土地利用转移的预测结果(表6)及InVEST模型预测的各土地利用类型碳储量(表7)可以得出,在空间分布上,白云鄂博矿区2030生态情景下碳储量与2020实际碳储量分布高度相似。由图6d~图6f可知,生态保护情景在保持固碳能力方面具有显著效果。而自然情景和城镇发展情景的碳储量空间分布相似度较高,均受到城市扩张的影响,导致碳储量的较大损失。综上所述,生态保护情景对维持区域碳储量起到了关键作用,而在自然情景和城镇发展情景下,碳储量的流失风险较大,亟需采取有效的土地利用管控与生态保护措施。

由表7可知,生态保护情景下碳储量总量最高,与2020年碳储量相比,下降幅度仅为 0.9×10^3 t, 降幅为 0.41%, 碳储量基本上维持不变。这表明,采取有效的生态修复措施可以有效维持区域的固碳能力。与此相对,其他两个情景碳储量变化幅度较大,其中自然情景降幅为 4.19%, 城镇发展为 4.73%。这表明,在历史发展趋势下,建设用地的持续扩张导致了碳储量的流失,存在较高的碳储量流失风险。

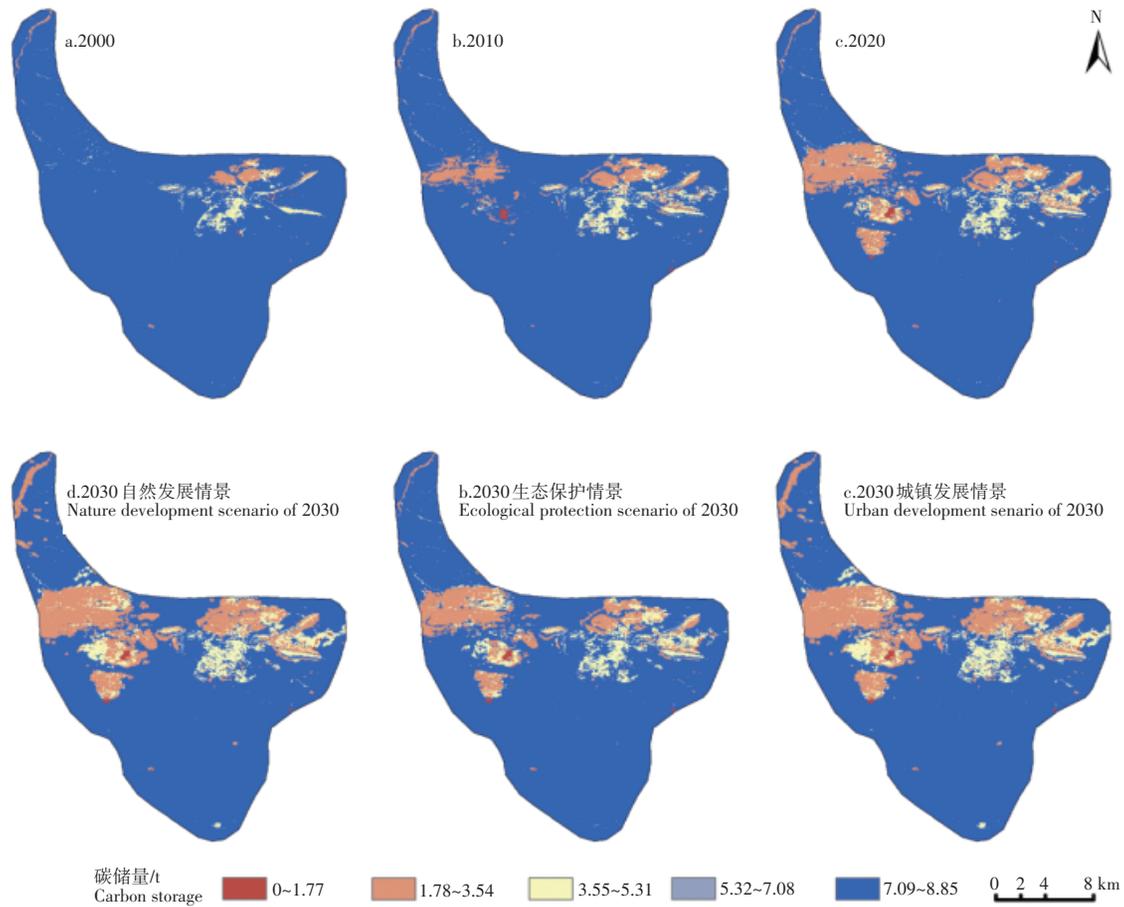


图6 白云鄂博矿区2000-2030碳储量分布

Figure 6 Distribution of carbon storage in Bayan Obo Mining District from 2000 to 2030

表7 白云鄂博矿区2000-2030年各土地利用类型碳储量

Table 7 Carbon storage of various land use types in Bayan Obo Mining District from 2000 to 2030

| 情景模式 Scenario model | 各土地利用类型碳储量/($\times 10^4$ t) Carbon storage of each land use type | | | | | 总碳储量/($\times 10^4$ t) Total carbon storage |
|---|---|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|---|
| | 耕地 Cultivated land | 草地 Grassland | 水体 Waterbody | 裸地 Bare land | 建设用地 Construction land | |
| 2000 | 6.71 | 230.27 | 0.00 | 1.58 | 2.90 | 241.46 |
| 2010 | 2.86 | 220.16 | 0.00 | 5.22 | 4.62 | 232.86 |
| 2020 | 2.41 | 202.63 | 0.00 | 10.11 | 6.62 | 221.77 |
| 2030年自然发展 2030 natural development | 2.18 | 187.66 | 0.00 | 13.83 | 8.82 | 212.49 |
| 2030年生态保护 2030 ecological protection | 5.51 | 199.28 | 0.00 | 9.02 | 7.87 | 221.68 |
| 2030年城镇发展 2030 urban development | 2.31 | 185.52 | 0.00 | 14.23 | 9.23 | 211.29 |

3 讨论与结论

本研究通过分析白云鄂博矿区 2000-2020 年间地类转换数据发现,草地、裸地、建设用地的转化是生态系统碳储量剧烈变化的主要原因,这和卢雅焱等^[30]对新疆天山固碳能力的研究结果一致,天山固碳量增加主要受益于森林恢复以及冰川退缩成未利用地,草地退化成未利用地是造成了碳储量减少的直接原因。碳储量的评估结果表明,研究区在此期间碳储量呈下降趋势,且碳储量的空间分布与土地利用的分布高度一致,高值区分布于植被覆盖度和碳密度高的草地,低值区集中分布于裸地和建设用地区域,草地向裸地、建设用地的转移直

接造成碳储量的流失,反之,则能促进碳储量增加,这和李俊等^[31]对昆明市的碳储量变化研究相符,昆明市土地利用类型与碳储量变化也具有高度一致性,高碳密度地向低碳密度地类的转化导致区域总碳储量减少。因此,草地、裸地和建设用地的互相转化在区域碳储量变化中起着关键作用,合理的土地利用规划对于维护生态系统碳储量至关重要。

土地利用变化不仅仅对碳储量产生短期影响,还会带来长期的生态后果,但生态修复措施存在滞后性,无法立即显示修复的效果。通过情景模拟,可以更科学的评估不同土地利用模式对碳储量的综合影响。本研究设置的3种情景,自然发展情景和城镇发展情景的碳储量都呈大幅度下降趋势,其中在自然发展情景下,碳储量的减少是因为矿业活动导致土地退化、裸地面积增加,生态系统碳吸存能力无法恢复;城镇发展情景下,碳储量将显著下降,主要原因在于土地利用类型从高碳储量的植被和农田转换为低碳储量的建设用地,同时城镇化过程中的碳排放增加进一步加剧了区域碳平衡的恶化;相比之下,生态保护情景优先保护矿区及周边生态系统,碳储量下降幅度显著减缓,与2020年的碳储量基本保持一致,充分体现了生态保护政策对内陆地区碳储量维护的关键作用。3种情景下的碳储量都和土地利用变化有紧密联系,这和徐自为等^[32]提出的建设用地取代耕地和林地是碳损失主要来源具有一致性。因此,未来矿区规划应优先引入生态补偿机制,以“土地利用-碳储量”协调优化为核心,构建“资源开发-生态修复-低碳经济”闭环,优先保护高碳汇地类,创新复合用地模式,联动碳交易市场,并依托智能模型实现动态调控,通过构建可持续发展的土地利用模式,不仅能够减缓碳储量的下降,还能实现区域生态系统的长期稳定和恢复。

本研究结果表明,土地利用空间分布特征研究发现,白云鄂博矿区碳储量最低值集中在矿山及其周边区域,距离矿山距离越远碳储量变化较小,这与白云鄂博矿区的地理位置及生态特征密切相关。当地生态系统类型结构简单,生态环境极为脆弱,风湿沙化土地比重较高,若缺乏生态修复措施,生态系统极容易崩溃,进一步加剧了碳储量的减少。2000-2020年间,白云鄂博矿区的碳储量呈现持续下降的趋势,总计损失 19.68×10^4 t,下降幅度为8.15%。其中,2000-2010年间,碳储量损失 8.60×10^4 t,下降幅度为3.56%;2010-2020年间,碳储量损失 11.08×10^4 t,下降幅度为4.76%;相比较而言碳储量下降速率进一步加快。建设用地和裸地面积的增加,白云鄂博矿区草地面积在过去20年间持续减少,这导致了碳储量的持续流失。设置自然发展、生态保护和城镇发展3种情景,2030年白云鄂博矿区的碳储量均有不同程度的下降。3种情景模拟碳储量与2020年相比,生态保护情景下的碳储量最高,为 22.17×10^5 t,下降 0.9×10^3 t;自然发展情景下的碳储量为 21.25×10^5 t,下降 92.80×10^3 t;而城镇发展情景碳储量最低,为 21.13×10^5 t,下降 105.00×10^3 t。3种情景模拟下白云鄂博矿区碳储量减少都集中在矿山周边人类活动频繁的地带。未来可通过加强矿山生态修复,提高草地面积维持当地的碳平衡。

综上所述,白云鄂博矿区的碳储量在过去20年间持续下降,主要受到建设用地扩张和矿产开发的影响。不同土地利用情景下的碳储量变化趋势表明,生态保护措施在稳定碳储量方面发挥了关键作用。为2030年顺利实现碳达峰的目标,未来应加强对矿山及其周边进行生态修复,提高草地面积;通过减少裸地扩张、提升植被覆盖率等措施遏制碳储量的进一步流失。此外,应将生态保护与区域经济发展相结合,制定科学合理的土地利用规划,以促进区域碳平衡的恢复和可持续发展,为碳达峰和碳中和目标的实现提供有力支撑,促进地区在生态保护的情景下实现高质量发展。

参考文献:

- [1] LEMPERT R J. Measuring global climate risk[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(10): 805-806.
- [2] XU G Y, WANG Y T, REHMAN H. The future trajectory of carbon emissions in the process of carbon neutrality in South Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118588.
- [3] 刘燕萍, 陈微尼, 仲怡铭, 等. 甘肃省公益林不同生态区位土壤理化特征研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(4): 440-446.
LIU Y P, CHEN Z N, ZHONG Y M, et al. Study on soil physical and chemical characteristics in different ecological zones of public welfare forests in Gansu Province[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(4): 440-446.
- [4] 林 彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于InVEST-PLUS模型的碳储量空间关联性及其预测——以广东省为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4827-4839.
LIN T, YANG M Z, WU D F, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model—A case study in Guangdong Province[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4827-4839.

- [5] 张海凤,崔桂善.土地利用/覆盖类型的变化对陆地生态系统碳收支的影响[J].中国资源综合利用,2019,37(1):176-179.
ZHANG H F,CUI G S.Effects of different land use/cover types on terrestrial ecosystem carbon budgets[J].China Resources Comprehensive Utilization,2019,37(1):176-179.
- [6] REN K J,WANG J H,SU H,et al.Risk assessment of haze disaster in the Liaoning region based on ArcGIS and principal component analysis[J].Ecological Indicators,2024,168:112757.
- [7] 张爽,高启晨,张戎,等.基于PLUS-InVEST模型碳储量时空演变及驱动因素分析—以纳帕海流域为例[J].中国环境科学,2024,44(9):5192-5201.
ZHANG S,GAO Q C,ZHANG R,et al.Evaluating the changes and driving factors of carbon storage using the PLUS-InVEST Model:A case study of Napa SeaBasin[J].China Environmental Science,2024,44(9):5192-5201.
- [8] 张楚磊,田耀武.河南省土壤有机碳储量及影响因素[J].环境监测管理与技术,2024,36(4):71-76.
ZHANG C L,TIAN Y W.Soil organic carbon storage and its influencing factors in henan[J].The Administration and Technique of Environmental Monitoring,2024,36(4):71-76.
- [9] 朱华,潘奕好,陈怡彤.2000-2030年杭州市土地利用变化对碳储量及其组分的影响[J].环境科学与技术,2024,47(11):22-34.
ZHU H,PAN Y H,CHEN Y T.Impact of LUCC on carbon storage and its components in Hangzhou from 2000 to 2030[J].Environmental Science & Technology,2024,47(11):22-34.
- [10] CHI Y K,HE C.Impact of land use change on the spatial and temporal evolution of ecosystem service values in South China Karst Areas[J].Forests,2023,14(5):893.
- [11] XING X L,LIU Y,JIN R,et al.Major role of natural wetland loss in the decline of wetland habitat quality—Spatio-temporal monitoring and predictive analysis[J].Sustainability,2023,15(16):12415.
- [12] 李衡,陈国银,王世晶,等.基于CLUE-S情景模拟的挠力河流域耕地适宜性评价研究[J].农业机械学报,2023,54(10):329-339.
LI H,CHEN G Y,WANG S J,et al.Suitability evaluation of cultivated land in Naoli River Basin based on CLUE-S scenario simulation[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):329-339.
- [13] DENG X L,SUN T,ZHOU D,et al.Significant negative impact of human activities on carbon storage in the Yellow River Delta over the past three decades[J].Science of The Total Environment,2024,956:177257.
- [14] JIAN L,XIA X J,LIU X Y,et al.Spatiotemporal variations and multi-scenario simulation of urban thermal environments based on complex networks and the PLUS model:A case study in Chengdu central districts[J].Sustainable Cities and Society,2024,115:105833.
- [15] 胡俊聪,何华贵,陈朝霞.基于PLUS模型的土地利用多情景模拟与时空特征分析[J].测绘通报,2023(10):28-33.
HU J C,HE H G,CHEN Z X.Multi-scenario simulation and spatial-temporal analysis of land use based on PLUS model[J].Bulletin of Surveying and Mapping 2023(10):28-33.
- [16] 张露尹,朱大明,左小清,等.基于InVEST模型的多情景下滇中城市群生境质量时空演变特征及预测[J].兰州大学学报(自然科学版),2024,60(4):547-555.
ZHANG L Y,ZHU D M,ZUO X Q,et al.Spatiotemporal evolution characteristics and prediction of habitat quality in the Central Yunnan Urban Agglomeration under multiple scenarios based on the InVEST model[J].Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2024,60(4):547-555.
- [17] 张鹏,李良涛,苏玉姣,等.基于PLUS和InVEST模型的邯郸市碳储量空间分布特征研究[J].水土保持通报,2023,43(3):338-348.
ZHANG P,LI L T,SU Y J,et al.Spatial and temporal distribution characteristics of carbon storage in Handan City based on PLUS and InVEST models[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2023,43(3):338-348.
- [18] YANG J,HUANG X.The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J].Earth System Science Data,2021,13(8):3907-3925.
- [19] REN K J,WANG J H,SU H,et al.Risk assessment of haze disaster in the Liaoning region based on ArcGIS and principal component analysis[J].Ecological Indicators,2024,168:112757.
- [20] LIANG X,GUAN Q F,CLARKE K C,et al.Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model:A case study in Wuhan,China[J].Computers,Environment and Urban Systems,2021,85:101659.
- [21] 吴掠桅,刘耿.基于人工蜂群CA模型的南京市土地利用变化模拟与预测[J].测绘通报,2022(2):95-99.
WU L W,LIU G.Simulation and prediction of land-use change in Nanjing based on artificial bee colony cellular automata model[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2022(2):95-99.

- [22] ZHANG C Y, JIA Q, LIU Y J, et al. Evaluation and multi scenario simulation of ecosystem service value in Zhengzhou Metropolitan Area based on PLUS model[J]. *Measurement: Sensors*, 2024, 32: 101079.
- [23] 席梅竹, 赵中秋, 赵颖丽. 基于 PLUS 模型的 2030 年滹沱河流域山区段生态承载力时空格局多情景预测[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(3): 518-529.
- XI M Z, ZHAO Z Q, ZHAO Y L. Multi-scenario prediction of the spatial and temporal patterns of ecological carrying capacity in the mountain section of Hutuo River Basin in 2030 based on the PLUS model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(3): 518-529.
- [24] 刘洪彬, 高嘉鞠, 吴梦瑶, 等. 东北三省黑土区耕地数量时空格局变化及其驱动机制研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2022, 53(4): 444-453.
- LIU H B, GAO J J, WU M Y, et al. Spatial-temporal pattern change of cultivated land quantity and its driving mechanism in black soil area of Northeast China[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2022, 53(4): 444-453.
- [25] 李全峰, 陈琳贺, 杭艳红, 等. 东北黑土区土地利用碳排放演变及预测研究[J]. *东北农业大学学报*, 2023, 54(10): 79-88.
- LI Q F, CHEN L H, HANG Y H, et al. Evolution and prediction of land use carbon emissions in the black soil region of Northeast China[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2023, 54(10): 79-88.
- [26] 徐云, 高明坤, 张增信. 基于 InVEST 模型的长江中下游地区生境质量变化研究[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(5): 355-364.
- XU Y, GAO M K, ZHANG Z X. Land Use change and its impact on habitat quality in the middle and lower reaches of the Yangtze River based on InVEST model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(5): 355-364.
- [27] 孙斌, 杜松朴, 薛建春, 等. 黄河流域新型城镇化—生态安全—公共健康协调发展研究——以内蒙古自治区为例[J]. *沈阳农业大学学报*, 2024, 55(1): 115-127.
- SUN B, DU S P, XUE J C, et al. Study on coordinated development of new urbanization, ecological security, and public health in the yellow river basin—A case study of inner mongolia autonomous region[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2024, 55(1): 115-127.
- [28] 郭晓朦, 王子龙, 王立. 基于不同单元尺度下黑土区阿什河流域碳储量时空变化与预测[J]. *东北农业大学学报*, 2024, 55(6): 78-89.
- GUO X M, WANG Z L, WANG L. Temporal-spatial variation and prediction of carbon storage in the Ashi River Watershed in black soil region at different scales[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2024, 55(6): 78-89.
- [29] 李媛媛, 尹珂. 重庆市中心城区碳储存服务评估: InVEST 模型和 ARIES 模型对比分析[J]. *生态学报*, 2025(4): 1-14.
- LI Y Y, YIN K. Evaluation of carbon storage service in central urban area of Chongqing: comparison between results from the InVEST model and ARIES model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025(4): 1-14.
- [30] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(6): 1896-1906.
- LU Y Y, XU X L, LI J C, et al. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(6): 1896-1906.
- [31] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(1): 378-387.
- LI J, YANG D H, WU F Z, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming city based on PLUS and InVEST models[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1): 378-387.
- [32] 徐自为, 张智杰. 基于土地利用变更调查的 2010-2016 年新疆尉犁县生态系统碳储量时空变化[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(11): 1909-1917.
- XU Z W, ZHANG Z J. Spatiotemporal variation of carbon storage in Yuli County during 2010-2016[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(11): 1909-1917.